



TITLE:

Ultra-high-Q SiC photonic nanocavities(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Jeon, Seung Woo

CITATION:

Jeon, Seung Woo. Ultra-high-Q SiC photonic nanocavities. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19723>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2017-03-22に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	田 昇 愚
論文題目	超高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本研究は、ワイドバンドギャップ半導体である「シリコンカーバイド(SiC)」を材料としたフォトニック結晶ナノ共振器の Q 値を大幅に向上させる方法を提案し、その実証を目指した検討を行い、従来の値を大幅に上回る世界最高の Q 値を実現した結果をまとめたものである。本研究は、序論(第 1 章)を含めて全 6 章より構成されている。</p> <p>フォトニック結晶とは、光の波長と同程度の周期的な屈折率分布をもち、光の伝搬を禁止するフォトニックバンドギャップ(PBG)を有するという特徴をもつ。さらに、フォトニック結晶内に人為的な欠陥を導入することにより、自在な光制御が可能であり、例えば欠陥を点状に設けることによって、大きさが光の波長程度と非常に小さな共振器が実現できる。近年、フォトニック結晶の材料として Si を用いることにより、光通信帯域において、高い光閉じ込め性能数（Q 値）をもつフォトニック結晶ナノ共振器が実現されており、光メモリや超小型波長フィルター、高感度センサー、高効率非線形光素子などへの応用研究も盛んに行われている。その一方で、材料の電子バンドギャップに起因する根本的な限界も明らかになりつつある。例えば、高 Q 値ナノ共振器に対して強いパワーの光を導入すると、二光子吸収が生じ、光の損失や共振特性の変化が生じることも判明している。</p> <p>申請者が所属する研究室では、この課題に対応するため、ワイドバンドギャップ半導体の一つである SiC をフォトニック結晶の材料として用いることを提案し、従来の材料では成し得なかった可視領域を含めた波長 550～1450 nm に渡る超広帯域動作、多光子吸収抑制による従来材料の約 100 倍以上のハイパワーに対する安定動作、第二高調波発生・和周波発生による波長変換、などについて世界で始めて実現していた。しかしながら、本研究の開始時点では、SiC フォトニック結晶ナノ共振器の Q 値は 1 万以下にとどまっており、より様々な分野への応用のためには、さらなる Q 値の向上が強く望まれている状況であった。例えば、第 2 次高調波発生出力効率は、理論的に Q 値の二乗に比例するため、超高 Q 値 SiC 共振器があれば超高効率の波長変換素子などへの応用が可能である。またこのような超高 Q 値 SiC 共振器は SiC 内部の結晶欠陥に存在する長いスピンコヒーレンス時間を持つ電子状態の量子情報を光学的に制御することにも利用できると考えられている。</p> <p>本論文では、まず、SiC フォトニック結晶共振器に関する設計から製作及び測定まで、すべての過程を再検討し、それによって、これまで Q 値が 1 万程度にとどまっていた原因を明らかにしている。さらに、この分析で引き出された問題の解決方法について検討し、Q 値を向上させる方法を提案し、最終的に従来の 30 倍もの Q 値をもつ世界最高の超高 Q 値 SiC ナノ共振器の実証に成功している。また、延いては超高 Q 値の SiC 共振器における非線形現象について考察し、今後 SiC 共振器の応用方向性を提案している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	田 昇 愚
<p>第 1 章では、研究背景として、従来の SiC フォトニック結晶ナノ共振器による光制御の実現例と課題を概観した上で、高 Q 値を達成することにより期待される効果について論じられている。</p> <p>第 2 章では、本研究において議論されている SiC フォトニック結晶の構造と基本動作について述べられている。また、2 次元フォトニック結晶の特性の理論解析手法、試料の作製手法、評価手法についても合わせて述べられている。</p> <p>第 3 章では、従来法により作製された SiC フォトニック結晶共振器の測定 Q 値が 1 万程度に留まっていた原因について考察されている。詳細な検討を行った結果、従来透明(無損失)であると考えてきた、フォトニック結晶を形成している SiC そのものに光吸収が存在していることが Q 値低下の主要因であることを明らかにしている。さらに、SiC に光吸収が発生した原因を調べるために、SiC の光ルミネセンスを測定するなどの評価を行った。その結果、フォトニック結晶作製に必要な薄膜 SiC を得るために行っている SiC への水素イオン打ち込みにより、SiC 結晶に格子欠陥が発生したことが原因であることを明らかにしている。以上の検討より、イオン打ち込みによる薄膜化を行わずに、フォトニック結晶を作製することが、SiC フォトニック結晶共振器の高 Q 値化のために重要であることを明らかにしている。</p> <p>第 4 章では、イオン打ち込みを用いずにフォトニック結晶を作製する新たな 2 つの方法の提案・検討および作製した試料の評価結果について述べられている。その第一の方法は、斜めエッチング技術を用いることで、SiC バルクの上にナノビーム構造フォトニック結晶共振器を作製する手法であり、この手法によって作製した構造の最大 Q 値は 4 万と、従来法により実現した Q 値より 4 倍以上高い値が得られている。第二の方法は、研削により SiC 薄膜を作製し、フォトニック結晶共振器を実現する手法であり、本手法により作製した SiC フォトニック結晶共振器では、30 万という非常に高い Q 値が実現されている。</p> <p>第 5 章では、第 4 章で述べられている手法により実現した、10 万以上の超高 Q 値の SiC フォトニック結晶ナノ共振器における非線形光学特性について検討されている。共振器内部のエネルギーは、Q 値に比例して高くなるため、従来の共振器に比べて高エネルギー密度が実現できる。まず、超高 Q 値の SiC 共振器において、mW レベルの入力に対しても多光子吸収が生じないことを示し、高いエネルギー密度を利用して高効率な非線形現象を発現させる上で、多光子吸収が問題にならないことを示している。さらに超高 Q 値 SiC における二次高調波発生を実験的に検証し、非常に高い効率での波長変換が起きていることを示唆する結果を得ている。本研究では、共振器の Q 値が従来の 10 倍に増加しているため、100 倍以上の効率向上が期待されるが、詳細な定量的評価は今後の実験を介して実証する予定とされている。</p> <p>第 6 章では、本研究の結論を述べるとともに、今後の課題について展望されている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、従来のワイドバンドギャップ半導体材料「シリコンカーバイド(SiC)」を用いたフォトリソニック結晶ナノ共振器の光閉じ込め性能数(Q 値)を飛躍的に向上させるための提案を行い、「超高 Q 値 SiC フォトリソニック結晶ナノ共振器」の実現可能性を検討したものである。申請者が所属する研究室では、SiC をフォトリソニック結晶ナノ共振器の材料として用いることを提案し、Q 値 1 万という共振器の実現に世界で初めて成功していた。本論文では、従来法により作製された共振器の Q 値が 1 万に留まっていた原因について考察し、ナノ共振器の Q 値のさらなる向上を実現した結果についてまとめられている。本論文において、得られた主な成果は次のとおりである。

1) 既存の SiC フォトリソニック結晶ナノ共振器の設計および製作、Q 値の測定について綿密に検討して、理論的に得られる Q 値に比べて実験的に得られた Q 値が非常に低いという点を明らかにした。

2) SiC フォトリソニック結晶ナノ共振器の Q 値が 1 万に留まっている原因は、SiC フォトリソニック結晶を構成する材料である SiC 薄膜内部の結晶欠陥に起因した光吸収損失であることを明らかにした。また、これが SiC を薄膜化する工程で用いられるイオン打ち込みの結果生じていることを明らかにした。

3)イオン打ち込みを用いずにフォトリソニック結晶共振器を作製し、高 Q 値化を達成する方法を 2 種類提案・実証した。1 つは、斜めエッチング技術を用いることで、純粋な SiC バルクの上にナノビーム構造フォトリソニック結晶共振器を作製する手法であり、本手法で作製された共振器では最大 4 万という、従来の 4 倍の値が得られた。2 つめは、研磨による SiC 薄膜化を利用した共振器作製手法であり、本手法で作製された SiC 共振器では最大 Q 値として 30 万という非常に高い値が得られた。これは従来を 30 倍以上回る値であり、SiC を用いたフォトリソニック結晶ナノ共振器でも 10 万以上の高い Q 値が得られることを世界で初めて実証した。

4)以上を踏まえ、超高 Q 値 SiC フォトリソニック結晶ナノ共振器の光学的特性、特に非線形光学特性について考察した。具体的には、まず超高 Q 値 SiC フォトリソニック結晶共振器においても、多光子吸収が効果的に抑制されることを確認し、つづいて二次高調波発生の実験的検討を行った結果、高 Q 値化による波長変換効率の大幅な向上を示唆する結果を得た。

以上のように、本論文は、日本のみならず全世界の関連研究分野においても先駆的なものであり、本研究の学術的意義は極めて高く評価でき、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 2 月 24 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。